

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Кремлев И.А., Леонов С.В., Гилев В.А.
Томский политехнический университет
iak40@tpu.ru

Введение

До появления ЭВМ скромные вычислительные возможности человека вынуждали к максимальному упрощению математических моделей (ведь в общем случае постановка задачи проектирования современной электрической машины является весьма сложной). Этот период в электромеханике характеризуется созданием инженерных методик проектирования, которые сыграли и продолжают играть важную роль в творческой деятельности инженера-конструктора. Однако с резким повышением использования электрических машин, как, впрочем, и других электромагнитных механизмов, принятые в моделях допущения становятся менее оправданными и приводят к заметным ошибкам. Кроме того, поскольку традиционный в недалеком прошлом подход к проектированию электромеханических преобразователей, опирающийся на натурное моделирование с изготовлением достаточно большого числа экспериментальных образцов и последующими их исследованиями (испытаниями) в настоящее время неприемлем (из-за финансовых причин или ограничений по срокам), необходимо существенно повышать адекватность математических моделей [1]. Сегодня разработка методов трехмерного моделирования является актуальной (и, главное, возможной). Ведь при анализе конструкций электрических машин необходим точный учет наличия большого воздушного зазора, несимметрии магнитной цепи, влияния ее насыщения (ярма и полюсов статора) на выходные характеристики и т. п.

Описание алгоритма

Сочетание алгоритмов оптимизации с методами анализа магнитного поля позволяет создать эффективный инструмент для проектирования сложных электромеханических систем. В связи с вышеобозначенным, предлагаемую статью можно рассматривать как продолжение работ, направленных на совершенствование методик проектирования специальных электрических машин. Для построения программы расчета была использована математическая модель, основанная на методе пространственных интегральных уравнений, позволяющих проводить численный расчет трехмерного магнитного поля.

Метод интегрирования по источникам поля заключается в использовании интегро-дифференциального уравнения, выражающего напряженность поля в точке наблюдения через

векторные характеристики источников поля (плотность тока и намагниченность вещества) [2]:

$$\vec{H}_q = \frac{J_c}{4\pi} \int_{V_o} \frac{[d\vec{l}, \vec{r}_{nq}]}{r_{nq}^3} dS_n - \frac{1}{4\pi} \text{grad}_q \int_{V_s} \frac{\vec{M}_p \vec{r}_{pq}}{r_{pq}^3} dV_p$$

,
[1]
где \vec{H}_q – вектор напряженности магнитного поля в точке наблюдения q ; J_c – плотность тока в обмотке; $d\vec{l}$ – элемент длины проводника, совпадающий по направлению с вектором плотности тока; dS_n – элемент сечения проводника, нормальный к плотности тока; V_o , V_s – объемы обмотки с током и намагниченного вещества; \vec{M}_p – намагниченность объема dV_p ; \vec{r}_{pq} – радиус-вектор, проведенный из элемента объема dV_p в точку наблюдения q ; \vec{r}_{nq} – радиус-вектор, проведенный от элемента проводника с током до точки наблюдения; r_{pq} , r_{nq} – модули соответствующих радиус-векторов.

С помощью выражения (1) напряженность магнитного поля можно определить в любой точке расчетной области при известном распределении плотности токов и намагниченности вещества. При этом пространство, занимаемое намагниченным веществом, разбивается на элементарные объемы, в пределах каждого из которых намагниченность постоянна и сосредоточена в центре тяжести. А проводник с током разбивается на элементарные участки тока. При расчете изменяющихся во времени магнитных полей используется временная дискретизация с шагом dt . Метод пространственных интегральных уравнений реализован на общей концепции метода вторичных источников, в котором пассивные элементы магнитной системы учитываются введением так называемых «фиктивных» источников. Уравнение (1) универсально и может быть использовано как для определения напряженности поля первичных источников, т. е. материалов с заранее известным распределением намагниченности, так и для расчета распределения намагниченности внутри пассивных элементов магнитной системы. Определение намагниченности производится по нелинейной характеристике $M(H)$, получаемой посредством пересчета зависимости $B(H)$ согласно выражению:

$$\overline{M}_q = \frac{\overline{B}_q}{4\mu_0} - \overline{H}_q \quad [2]$$

где \overline{B}_q – вектор индукции магнитного поля, совпадающий в пределах по направлению с \overline{H}_q , модуль которого определяется по характеристике материала $B(H)$. Таким образом, определив распределение намагниченности по объему магнитомягких ферромагнитных материалов, принимаемых за пассивные элементы магнитной системы, решение задачи сводится к расчету параметров поля в исследуемой области. При этом предполагается, что магнитное поле создается всеми как активными, так и пассивными элементами магнитной системы. Из рассмотренных выше этапов наиболее затруднительным является определение векторов намагниченности, распределенных по объему пассивных элементов магнитной системы. Для решения этой задачи используются методы итерационного расчета системы нелинейных алгебраических уравнений. В заключительной части расчета, после определения векторов намагниченности производится вывод основных результатов и интегрирование распределенных параметров магнитного поля в исследуемой области пространства с целью определения магнитного потока, ЭДС, потокосцепления обмотки и электромагнитных сил. Для построения универсальной программы расчета был разработан алгоритм описания геометрии электромеханических устройств, позволяющий моделировать магнитные системы практически любой конфигурации и степени сложности. Расчетная область представляется набором различных геометрических фигур, которые подбираются из условия наиболее точного описания геометрии моделируемого устройства. В свою очередь эти фигуры разбиваются на элементарные объемы, имеющие одинаковое для всех фигур математическое описание. Оценка адекватности программы расчета была проведена путем сравнения полученных расчетных данных с экспериментальными исследованиями простейшей магнитной системы. Численный анализ магнитного поля, полученного при внесении ферромагнитного кольца в поле высокоэнергетического цилиндрического постоянного магнита, показал работоспособность и эффективность используемой модели.

Заключение

Расхождение в результатах составило не более 7 %. Разработанная программа может быть использована при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в сфере электромеханики для анализа электромагнитных процессов, протекающих в магнитной системе. Она широко используется при расчете магнитных систем, содержащих

высококоэрцитивные постоянные магниты. В связи с вышеобозначенным, предлагаемую статью можно рассматривать как продолжение работ, направленных на совершенствование методик проектирования специальных электрических машин. Для построения программы расчета была использована математическая модель, основанная на методе пространственных интегральных уравнений, позволяющих проводить численный расчет трехмерного магнитного поля.

Список использованных источников

1. Курбатов Е.М. Современное состояние прецизионных электромеханических систем и устройств разработки и производства ОАО «ИСС». // Форум школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Космическое приборостроение». – Томск, 2013. – Т. 1. – С. 40-41.
2. Кремлев И.А., Гилев В.А., Зеленин М.В. Моделирование синхронного двигателя с электромагнитной редукцией скорости в Ansys Maxwell. // III Молодежный международный форум «Интеллектуальные энергосистемы». – Томск, 2015. – Т. 2. – С. 211-214.
3. Леонов С.В. Федянин А.Л. Муравлев О.П. Статическая модель герметичного синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными полюсами. Известия ТПУ Выпуск № 4 / том 312 / 2008.